

Modelado de las Fuerzas de Corte en el Fresado de Piezas de Paredes Delgadas

Eduardo Diez¹, Mario Guzmán¹, Hilde Pérez², Antonio Vizán³

(1) Dpto. de Ing. Mecánica, Univ. de La Frontera, (2) Dpto. de Ingeniería Mecánica, Univ. de León. (3) Dpto. de Ing. Mecánica y Fabricación, Univ. Politécnica de Madrid (España)
(eduardo.diez@ufrontera.cl)

RESUMEN

En este trabajo se aborda el problema de la simulación de las fuerzas de corte en fresado cuando la pieza a mecanizar es flexible. Se presenta el desarrollo de un modelo matemático de tipo mecanicista que relaciona las fuerzas de corte y las deformaciones de la pieza durante la operación de fabricación. El énfasis del desarrollo de este modelo está puesto en la rapidez de cálculo de las fuerzas de corte. Esta característica facilitaría la implementación del modelo en sistemas de corrección de la deformación en tiempo real. El estudio experimental consiste en la validación del modelo propuesto mediante la comparación de fuerzas simuladas y fuerzas medidas, y en el desarrollo de un sistema de medición en línea de la deformación de la pieza, orientado a aplicaciones de compensación activa de la deformación. El modelo propuesto permite la estimación rápida y precisa de las fuerzas de corte y la deformación de la pieza en operaciones de fresado periférico de piezas flexibles.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de mecanizado juegan un rol preponderante en la fabricación de piezas en industrias clave para el desarrollo económico mundial. Durante los últimos años, en particular en la industria aeroespacial, el interés por la eficiencia energética ha favorecido la investigación y desarrollo de nuevas aleaciones metálicas, más livianas y resistentes, lo que ha dado lugar al diseño optimizado de componentes que son difíciles de fabricar. En este sentido, una de las dificultades que se presenta durante el mecanizado de piezas de pared delgada, comunes en la industria aeronáutica, son las deformaciones que sufre la pieza debido a la flexibilidad de sus paredes. La deformación de la pieza durante el mecanizado trae consigo pérdida de calidad del producto final y además afecta la productividad del proceso.

La corrección de los errores de fabricación debido a la deformación de la pieza y la herramienta ha sido abordada por investigaciones que proponen el uso de metodologías de corrección de la trayectoria de la herramienta a partir de simulaciones numéricas de la deformación, mediante método de elementos finitos (Gang, 2007; Ratchev et al., 2006). Otros investigadores han propuesto el uso de sistemas mecatrónicos orientados a compensar la deformación en línea (Drossel y Wittstock, 2008; Neugebauer et al., 2010) usando actuadores piezoeléctricos.

En este trabajo se presenta un análisis teórico experimental de las deformaciones que experimenta una pieza flexible durante el mecanizado. Se presenta el desarrollo de un modelo matemático de tipo mecanicista que relaciona las fuerzas de corte y las deformaciones de la pieza durante la operación de fabricación. El énfasis del desarrollo de este modelo está puesto en la

rapidez de cálculo de las fuerzas de corte, característica que ha sido poco abordada en los trabajos sobre mecanizado considerando la flexibilidad de la pieza o la herramienta. Esta característica facilitaría la implementación del modelo en sistemas de corrección de la deformación en tiempo real. El estudio experimental consiste en la validación del modelo propuesto y en el desarrollo de un sistema de medición en línea de la deformación de la pieza, orientado a aplicaciones de compensación activa de la deformación.

SIMULACIÓN DE LAS FUERZAS DE CORTE EN FRESADO

Los modelos de estimación de fuerzas de corte pueden ser clasificados en 4 grupos: Modelos basados en la teoría del plano de corte, modelos basados en la teoría de líneas de deslizamiento, modelos basados en métodos numéricos y modelos basados en la presión específica de corte. Entre estos grupos, los modelos basados en la presión específica de corte, han recibido especial atención por parte de los investigadores (Kline et al., 1982). Este tipo de modelos se basa en la relación entre el espesor de viruta antes del corte y la fuerza instantánea de corte para una herramienta dada y un material dado. La aptitud de este tipo de modelos para predecir las fuerzas, dependerá fundamentalmente de una adecuada estimación del espesor de viruta antes del corte, que en el caso del fresado es variable a lo largo del filo de corte y a medida que la herramienta gira.

En particular, en el fresado de piezas de paredes delgadas, la baja rigidez de la pieza impone severas restricciones a la productividad del proceso. Por un lado, la baja rigidez hace que las fuerzas de corte tiendan a deformar la pieza. Esto produce desviaciones de la trayectoria de la herramienta, que en algunos casos pueden ser muy significativas, afectando las tolerancias de fabricación del componente mecanizado. Por otra parte, con el fin de disminuir estos errores, se tiende a utilizar condiciones de corte menos severas, lo cual aumenta los tiempos de fabricación.

El estudio de las deformaciones en el mecanizado de piezas de paredes delgadas se centra principalmente en la cuantificación de los errores mediante medición directa o simulación a través de modelos de fuerzas de corte. En el caso de simulación, es necesario el cálculo de las deformaciones y las fuerzas de corte de forma simultánea, lo cual demanda procesos iterativos. Estos cálculos han sido llevados a cabo por medio de simulación por elementos finitos (Gang, 2007) y mediante modelos mecanicistas de mecanizado (Sutherland y DeVor, 1986; Budak y Altintas, 1995).

En el trabajo realizado por Sutherland y DeVor (Sutherland y DeVor, 1986) se desarrolla un modelo mecanicista para la estimación de las fuerzas de corte en sistemas de mecanizado flexibles considerando el alabeo de la herramienta. Se concluye que la deformación del sistema (pieza y herramienta) actúa moderando el efecto que tiene el alabeo en las fuerzas de corte. Más recientemente, Budak y Altintas (Budak y Altintas, 1995) desarrollaron un modelo de fuerzas de corte considerando la deformación de la pieza y la herramienta, con el objetivo de optimizar las condiciones de corte que minimizan la influencia de la deformación estática en los errores de forma de la pieza mecanizada. El énfasis de los modelos anteriores y otros similares desarrollados con posterioridad, ha sido puesto en la precisión en la estimación de las fuerzas considerando diferentes condiciones de corte. Para lograr este objetivo, y dada la complejidad de la geometría de la zona de corte en fresado en un instante determinado y para unas condiciones de corte dadas, es necesario discretizar el filo de corte, dividiendo la herramienta en secciones de pequeño espesor (o discos) en que las condiciones de corte se pueden considerar constantes. Este

enfoque hace que los modelos resultantes sean más complejos, requiriéndose más recursos de cálculo para su implementación computacional. Este último punto es crítico a la hora de querer implementar estos modelos en controladores en tiempo real, por ejemplo en aplicaciones de control adaptativo de procesos de mecanizado.

Dado lo anterior, los autores de este trabajo han desarrollado previamente un modelo para la estimación de las fuerzas basado en la presión específica de corte, que calcula las fuerzas a partir del espesor medio de viruta en cada posición de la herramienta. De esta forma se necesita solo un cálculo para cada posición angular de la herramienta. Las bases de este modelo pueden ser consultadas en un artículo publicado recientemente por Perez et al. (Perez et al., 2013).

EL MODELO PROPUESTO

El modelo presentado en este trabajo se construye a partir del modelo mecanicista de fuerzas de corte previamente desarrollado por los autores y que se basa en el espesor medio de viruta (Perez et al., 2013). La figura 1 muestra las variables consideradas en la situación de fresado periférico, común en el fresado de piezas de pared delgada. Como se observa en la figura, el espesor de viruta es variable a lo largo del filo de corte, haciendo que las fuerzas de fresado sean variables a lo largo del filo.

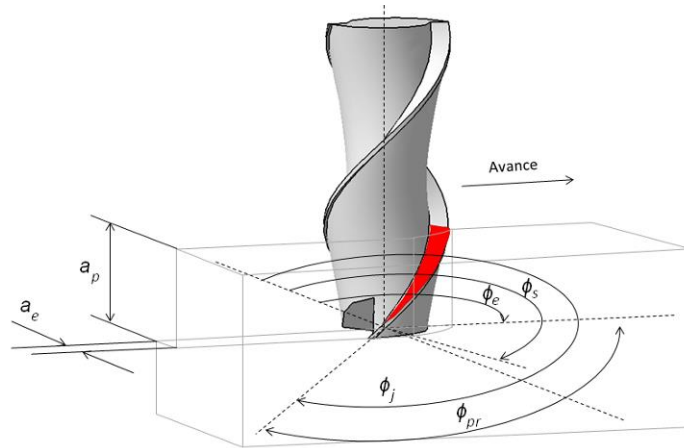


Fig. 1: Geometría del corte en fresado periférico.

Las fuerzas de corte y radial en función del espesor medio de viruta, están dadas por las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$F_c(\phi) = k_c(\phi) \cdot a_p(\phi) \cdot \bar{h}(\phi) \quad (1)$$

$$F_r(\phi) = k_r(\phi) \cdot a_p(\phi) \cdot \bar{h}(\phi) \quad (2)$$

Donde k_c y k_r son la presión específica de corte y radial, a determinar experimentalmente mediante ajuste de funciones potenciales a partir de mediciones de fuerzas de corte en ensayos de mecanizado. $a_p(\phi)$ es la profundidad de corte axial en cada posición angular de la herramienta.

El espesor medio de viruta $\bar{h}(\phi)$ se determinará en función de la geometría del corte. Se pueden

dar varias situaciones. En el caso de interés en este trabajo, el fresado periférico de piezas de paredes delgadas, es frecuente encontrar profundidades de corte radial pequeñas en comparación con la profundidad de corte axial. En estas condiciones, el cálculo del espesor medio de viruta conllevará cuatro casos, como se muestra en la figura 2: Filo no cortando (A), filo entrando a la zona de corte (B), filo en la zona media (C), y filo saliendo de la zona de corte (D). Los espesores medios de viruta cuando el filo j-ésimo está en la zona de empañe se pueden calcular mediante la ecuación 3.

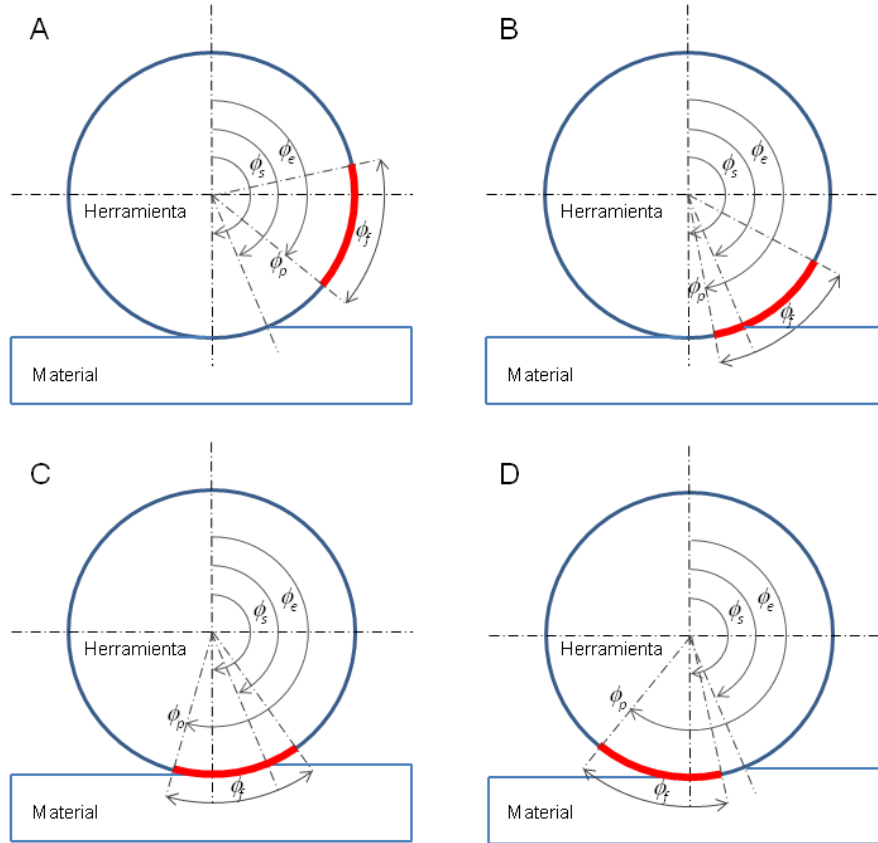


Fig. 2: Situaciones para el cálculo del espesor medio de viruta.

$$\bar{h} = \begin{cases} 0 & ; \quad \phi_j \leq \phi_e & \text{Filo no corta : Zona A} \\ \frac{1}{\phi_j - \phi_e} f_t [\cos(\phi_e) - \cos(\phi_j)] & ; \quad \phi_e < \phi_j \leq \phi_s & \text{Filo entrando : Zona B} \\ \frac{1}{\phi_s - \phi_e} f_t [\cos(\phi_e) - \cos(\phi_s)] & ; \quad \phi_s < \phi_j \leq \phi_e + \phi_{pr} & \text{Filo en zona media : Zona C} \\ \frac{1}{\phi_s - (\phi_j - \phi_{pr})} f_t [\cos(\phi_j - \phi_{pr}) - \cos(\phi_s)] & ; \quad \phi_s < \phi_j \leq \phi_s + \phi_{pr} & \text{Filo saliendo : Zona D} \end{cases} \quad (3)$$

En este trabajo se incorpora la influencia que tiene en las fuerzas de corte la deformación que experimenta la pieza durante el mecanizado. Como ya apuntaron Budak y Altintas (Budak y Altintas, 1995), la deformación de la pieza hace variar la profundidad de corte radial a_e . Si en el

punto de corte considerado la pieza está experimentando una deformación $\delta(\phi)$, entonces la profundidad de corte radial real en ese punto de corte se podrá calcular mediante la ecuación 4.

$$a_{er}(\phi) = a_e - \delta(\phi) \quad (4)$$

La variación de la profundidad de corte radial modifica el ángulo de empañe real de la operación. En el caso del fresado en concordancia, el ángulo de salida no sufre modificación alguna, mientras que el ángulo de entrada ϕ_e real será variable y estará dado por la ecuación 5. Esto afecta al espesor medio de viruta y por ende a las fuerzas de corte.

$$\phi_{er}(\phi) = \pi - \arccos\left(1 - \frac{a_{er}(\phi)}{R}\right) \quad (5)$$

El cálculo de las fuerzas de corte tomando en cuenta la flexibilidad de la pieza, se realiza mediante un procedimiento iterativo. Este procedimiento se inicia calculando el espesor de viruta y la fuerza de corte nominales (sin deformación). Luego, conocida la rigidez de la pieza, se calcula la deformación que experimenta la pieza bajo la acción de la fuerza de corte nominal. La deformación de la pieza modifica el espesor de viruta, que se vuelve a calcular junto con la fuerza de corte. Este procedimiento se repite en cada posición angular de la herramienta hasta llegar a una situación de equilibrio, en que las fuerzas calculadas en dos iteraciones consecutivas ya no varían más allá de un valor previamente establecido.

RESULTADOS

Con el objetivo de verificar el modelo propuesto, se procedió a simular las fuerzas de corte en distintas condiciones que es frecuente encontrar en el mecanizado de piezas de paredes delgadas. Posteriormente se llevó a cabo una serie de ensayos de mecanizado con las mismas condiciones simuladas. Los resultados de simulación mostraron una adecuada correspondencia con los resultados medidos y están de acuerdo con los resultados presentados por otros investigadores (Budak y Altintas, 1995; Budak, 2005).

Con el objetivo de verificar el modelo propuesto, se llevaron a cabo ensayos de mecanizado utilizando el montaje que se muestra en la figura 3. El montaje está compuesto por una pieza de trabajo (probeta) que se monta sobre un soporte flexible, con el fin de simular la flexibilidad de una pieza de pared delgada. El soporte fue diseñado y calculado para deformarse en el rango de 0-60 μm para los niveles de fuerza de corte típicos a ser ensayados, que cubren un amplio rango de tipos de operaciones. Para las condiciones a ensayar, y dada la rigidez del soporte, se puede considerar que la herramienta es considerablemente menos flexible que el soporte, por lo que se puede asumir perfectamente rígida. Se optó por utilizar el soporte con el fin de eliminar algunos efectos dinámicos que estarían presentes en el mecanizado de una pieza de pared delgada. Dichos efectos están relacionados con el hecho de que una pieza de pared delgada posee varias frecuencias propias que van cambiando durante el mecanizado, que modifica la geometría de la pieza afectando su rigidez y masa. Por el contrario, el utillaje diseñado posee un grado de libertad predominante, y sus características dinámicas pueden ser consideradas invariantes a medida que se realiza un ensayo de corte de la pieza.

Para la realización de los ensayos, el conjunto soporte y pieza se monta sobre una plataforma dinamométrica Kistler 9257A capaz de medir las fuerzas de corte en tres ejes. La instalación experimental considera además la medición de desplazamiento mediante un sensor de triangulación laser MTI de la familia LTC. Este sensor permite medir la deformación del soporte durante el fresado de la pieza, con una resolución de 200 nm. Las fuerzas de corte y la deformación del soporte fueron medidas con una tarjeta de adquisición de datos NI PXI 4472b que permite el muestreo simultáneo de todos los canales, lo que asegura una adecuada correlación temporal entre los datos medidos por cada canal. Los datos de fuerza y deformación fueron registrados utilizando una velocidad de muestreo de 10 kHz y un filtro pasabajas con una frecuencia de corte de 100 Hz.

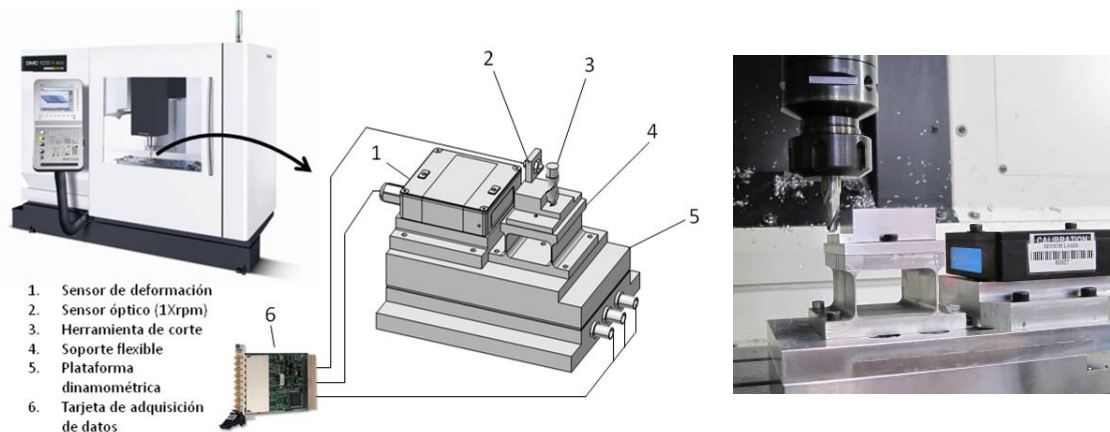


Fig. 3: Montaje experimental empleado para la verificación del modelo.

A continuación se presentan los resultados de simulación y experimentales correspondientes a las condiciones de corte dadas en la tabla 1. La figura 4 muestra las fuerzas de corte para el caso rígido.

Tabla 1: Datos de la herramienta y condiciones de corte consideradas en la simulación y ensayo de las fuerzas de fresado mostradas en las figuras 4 y 5. Material de la pieza AL 7075.

Datos de la herramienta	
Marca	Garant
Tipo material	HSS
Diámetro, (mm)	8
Número de filos (Un filo eliminado)	1
Ángulo de hélice, (grados)	30
Condiciones de corte, fresado en concordancia	
Profundidad de corte axial, a_p (mm)	8
Profundidad de corte radial, a_e (mm)	0,54
Avance por filo, f_t (mm/filo)	0,04
Ángulo de entrada, ϕ_e (grados)	150
Ángulo de salida, ϕ_s (grados)	180
Presión específica	
K_{t0} ; m (N/mm ²)	26,99; 0,928
K_{r0} ; n	10,41; 1,12

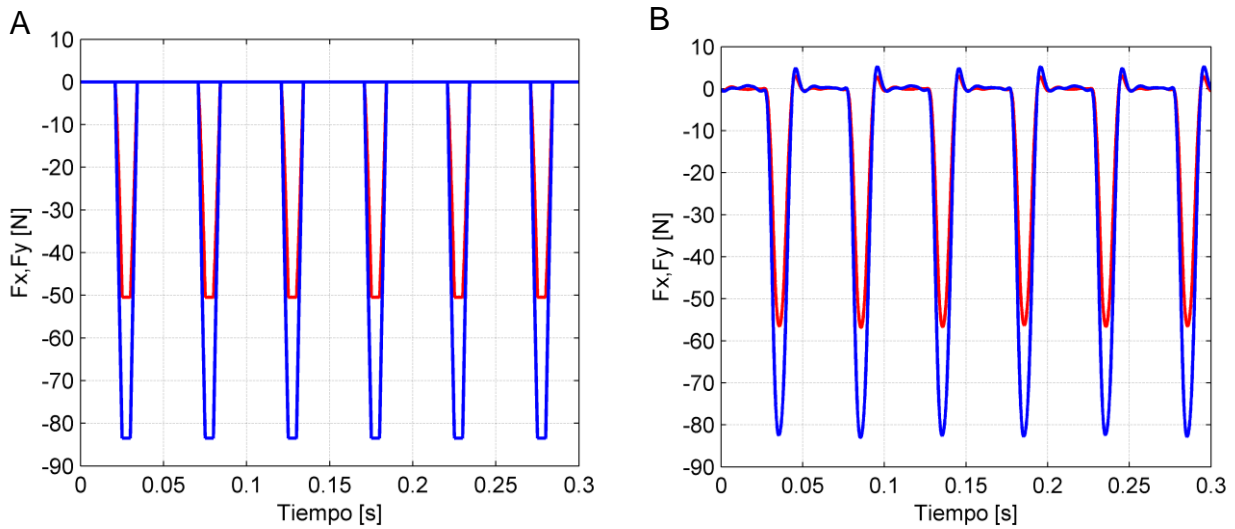


Fig. 4: Fuerzas de corte simuladas (A) y medidas (B) para una pieza rígida, con las condiciones mostradas en la tabla 1.

El caso flexible se simuló considerando que la rigidez de la pieza es constante e igual $1,4 \text{ N}/\mu\text{m}$, que equivale a la rigidez del soporte flexible. La figura 5 muestra las fuerzas de fresado para las mismas condiciones de corte presentadas en la tabla 1, pero considerando la pieza flexible. Como era de esperar, se observa una disminución en la magnitud de las fuerzas de fresado debido a la flexibilidad de la pieza. Esto se explica debido a que la deformación que sufre la pieza hace disminuir el espesor de viruta nominal provocando una disminución de las fuerzas de corte. La figura 6 muestra la deformación que experimenta el soporte durante el mecanizado.

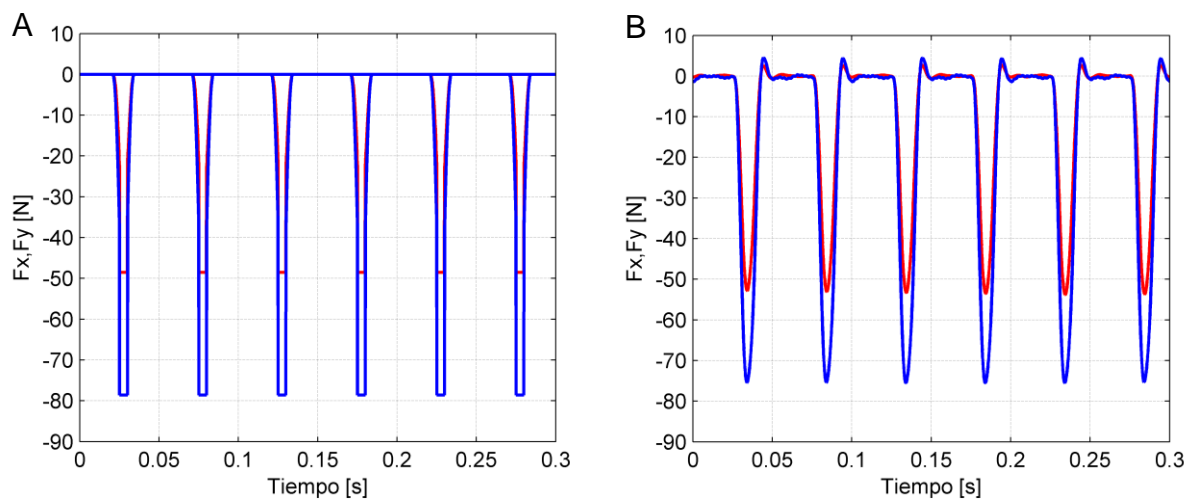


Fig. 5: Fuerzas de corte simuladas (A) y medidas (B) para el fresado de una pieza flexible, con las condiciones mostradas en la tabla 1.

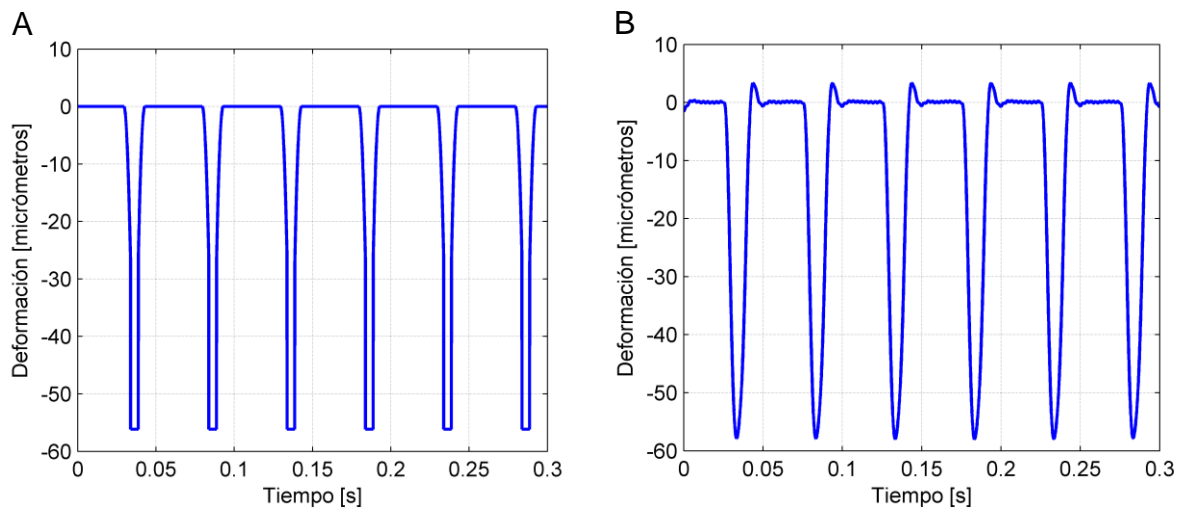


Fig. 6: Deformación del soporte simulada (A) y medida (B) para el fresado de una pieza flexible, con las condiciones mostradas en la tabla 1.

En los casos presentados, y como muestran resultados publicados anteriormente para un sistema rígido (Perez et al., 2013), el modelo de fuerzas de corte del espesor medio considerando la flexibilidad de la pieza, permitió estimar adecuadamente las fuerzas de fresado así como la deformación de la pieza. Esta tarea se pudo realizar en un tiempo considerablemente menor al que demandan otros métodos de cálculo que discretizan el filo de corte.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un modelo para la simulación de las fuerzas de corte en el fresado de piezas flexibles. A diferencia de otros modelos presentes en la literatura, el modelo mecanicista desarrollado, basado en el espesor medio de viruta, permite calcular en un paso las fuerzas de mecanizado en cada posición angular de la herramienta, sin necesidad de discretizar el filo de corte, simplificando considerablemente el procedimiento de estimación de la fuerza y disminuyendo el tiempo de cálculo. Los resultados de simulación y experimentales muestran que el modelo presentado estima las fuerzas de corte con precisión adecuada. Estas características hacen que el modelo sea apropiado para su aplicación en sistemas de control en tiempo real del proceso de fresado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad de La Frontera a través del proyecto DI13-0018 y por la Universidad Politécnica de Madrid a través del proyecto AL13-RT-06.

REFERENCIAS

Budak E., Altintas Y., Modeling and avoidance of static form errors in peripheral milling of plates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 35, 459–476 (1995)

Budak E., Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 46, 1478-1488 (2006)

Drossel W., Wittstock V., Adaptive spindle support for improving machining operations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*: 57, 395-398 (2008)

Gang L., Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process, *Journal of Materials Processing Technology*: 209, 2788–2793 (2007)

Kline W.A., DeVor R.E., Lindberg v, The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts *International Journal of Machine Tool Design and Research*: 22, 7–22 (1982)

Neugebauer R., Drossel W., Bucht A., Kranz B., Pagel K., Control design and experimental validation of an adaptive spindle support for enhanced cutting processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*: 59, 373-376 (2010).

Perez H., Diez E., Márquez JJ., Vizan A., An enhanced method for cutting force estimation in peripheral milling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI: 10.1007/s00170-013-5153-0

Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A.A., An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46, 542–551 (2006)

Sutherland J.W., DeVor R.E., An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems. *Journal of Engineering for Industry*: 108, 269 – 279 (1986).